专题：新材料科学发展战略思考与创新实践
Advanced Materials Science Development Strategy and Innovative Practice

引用格式：王子昊, 王霆, 张建军. 硅基光电异质集成的发展与思考. 中国科学院院刊, 2022, 37(3): 360-367.
Wang Z H, Wang T, Zhang J J. Development and thinking of silicon photonics heterogenous integration. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(3): 360-367. (in Chinese)

硅基光电异质集成的发展与思考

王子昊　王　霆　张建军*

1 中国科学院物理研究所　北京　100190
2 松山湖材料实验室　东莞　523808

摘要　光电子器件与传统微电子硅基互补金属氧化物半导体（CMOS）芯片的集成是未来信息技术的重要发展方向。现有硅基光电子集成技术得益于CMOS技术高集成度、低成本的优势，但主要采用硅材料制成，受限于硅材料本身的光电性质。硅基光电异质集成技术在利用CMOS晶圆制造优势的同时可兼容更多性能优异的光电异质材料，是未来光电集成技术的主要发展方向。文章介绍了该方向世界范围内的飞速发展形势及我国在该领域的研究基础，探讨了该领域未来的发展趋势和蕴藏的重要创新机遇。

关键词　光电集成，硅基光电子，异质集成

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20211208005

1 硅基光电异质集成是光电集成芯片的未来

21世纪是大数据、云计算时代。半个世纪以来，微电子技术大致遵循着“摩尔定律”快速发展，人们对信息传输和处理的要求越来越高。随着信息技术的不断拓宽和深入，芯片的制成工艺已减小到10 nm以下，但由此带来的串扰、发热和高功耗问题成为微电子技术难以解决的瓶颈。后摩尔时代的微电子芯片制程技术路线可分为继续优化互补金属氧化物半导体（CMOS）工艺的“延续摩尔”（more Moore）路线、利用先进封装技术实现系统级封装的“扩展摩尔”（more than Moore）路线和通过新材料新器件实现的“超越摩尔”（beyond CMOS）路线。相比于“延续摩尔”路线对于半导体先进设备的依赖和巨大投入，通过光电异质集成技术实现芯片间及芯片内光互联可有效解决微电子芯片目前金属互联的带宽、功耗和延时等问题，是对现有微电子芯片的重要拓展。同时，通过光电异质集成多种材料也可制作新一代信息器件（如光量子集成芯片），是信息产业实现扩展摩尔和超越摩尔技术路线的重要领域。

硅基光电子集成技术（简称“硅光技术”），通过传统微电子CMOS工艺实现光电子器件和微电子器

*通信作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（B类）（XDB30000000）
修改稿收到日期：2022年3月1日

件的单片集成，是研究和开发以光子和电子为信息载体的硅基大规模集成技术[1]。图1为硅基光电子集成芯片的概念图，该芯片由光源、调制器、光波导、探测器及电路芯片构成，由激光器产生光信号并通过调制器和探测器实现高速电信号与光信号的收发。目前，硅光技术主要采用基于SOI（绝缘衬底上硅）衬底的制造平台，已能实现探测器与调制器的单片集成。然而硅基光电子集成芯片的性能受限于硅材料本身的光电性能，仍存在无法高密度集成光源、集成低损耗高速光电调制器等问题。因此，利用不同种材料发挥其各自光电特性优势的硅基光电异质集成技术近年来发展迅速。硅基光电异质集成技术不仅拥有硅材料可大规模CMOS制造的特点，同时充分发挥不同材料的优异光电特性，可实现传统硅光技术无法媲美的器件指标，进而实现真正意义上的硅基光电子单片集成系统。本文将对该领域国内外发展现状做简要介绍，同时对未来该方向的发展进行展望。

2 硅基光电异质集成技术路线及发展

2.1 硅基光电异质集成技术路线

相较于微电子领域集成电路的飞速发展，光电子领域的集成化道路显得阻碍重重。自从Soref[2]20世纪80年代末期最早提出硅光技术以来，虽然无论在器件性能、集成度还是应用方面都有了众多突破性进展，但至今仍有很多主流光模块厂商依然采用光电器件分立封装的形式，主要原因是受限于硅材料本身的光电性质。例如，硅材料间接带隙的能带结构使得它无法实现高效率的片上光源，线性光电效应（Pockels效应）限制了调制器的速度。图2列举了目前各种材料体系所对应的优势光电器件，如Ⅲ-Ⅴ族材料制作的激光器光源、单光子源、调制器，Ge（锗）材料制作的探测器，$LiNbO_3$（铌酸锂）材料调制器，磁光材料YIG（钇铁石榴石）光隔离器，二维材料调制器，SiN（氮化硅）材料制作的宽谱低损耗光波导等[3]。其中，对于光通信应用，Ⅲ-Ⅴ族材料制作的光源、$LiNbO_3$制作的调制器和YIG材料制作的隔离器相比于硅基器件具有无法比拟的优势。因此，实现真正意义上大规模光电集成芯片的产业应用，需要依托硅材料与不同种类光电材料的异质集成，以充分发挥各种材料的优异特性。

通过多年研发努力，目前硅光领域已实现了多种光电器件的硅基集成，如各种硅基无源器件（波导、合分波器）、锗硅探测器、硅调制器，在一定程度上可以满足目前400 Gbps以下速率光模块的应用[4]。但

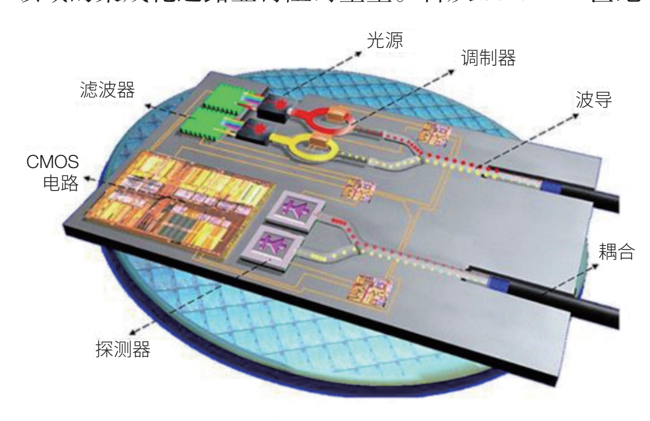


图1　硅基光电子集成芯片概念图①

Figure 1　Concept diagram of silicon-based optoelectronic integrated chip①

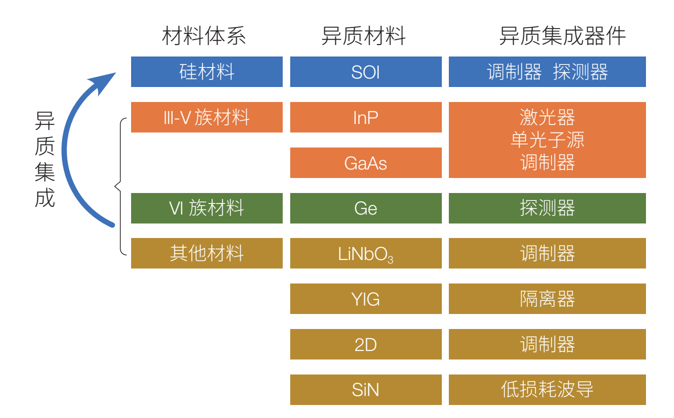


图2　可以用于硅基光电异质集成的材料体系及光电器件

Figure 2　Schematic overview of multiple material systems and devices for silicon photonics heterogeneous integration

① http://www.iccsz.com/site/cn/News/2020/08/17/20200817005009277916.htm.

是，光源技术仍是硅光芯片无法攻克的技术难题，必须采用异质集成。因此，本文以光源为例展开对异质集成各技术路线的讨论。图 3 展示了目前硅基光电异质集成领域的多种技术路线，从左到右的技术方案集成度由低到高，技术成熟度由高到低。① 片间混合集成技术。其与目前产业化应用最广泛的透镜耦合最为接近，但本质上还属于微封装技术，在多个光源耦合的应用中需要耗费大量时间在精密耦合对准工艺上，同时无法进行大规模光源的集成；目前有部分光模块公司采取该方案制作硅光产品。② 片上倒装焊技术。通过将制备好的激光器芯片进行倒装焊集成到硅光芯片上，解决了可以集成光源的问题。但硅光芯片需要刻蚀开槽精确控制激光器耦合高度，同时仍需要解决高精度耦合问题，因此产业中该方案也没有得到应用。③ 片上键合异质集成技术。最早由美国加州大学圣芭芭拉分校 John Bowers 课题组提出，通过键合 Ⅲ-Ⅴ族外延材料到已加工好的硅光晶圆上然后通过后工艺制作 Ⅲ-Ⅴ族有源器件。该技术可实现 Ⅲ-Ⅴ族材料与硅光芯片的大规模集成，但开发难度大，产品良率难以控制；目前只有美国 Intel 公司实现了该技术路线的量产。④ 片上直接生长异质集成技术。通过在已制作好的硅光晶圆上开槽，利用选区外延的方法生长Ⅲ-Ⅴ族材料，随后通过Ⅲ-Ⅴ族工艺制造光源。该种方法类似键合异质集成的流片过程，但不需要复杂的芯片到晶圆键合（die to wafer bonding）工艺，是最接近于 CMOS 集成工艺的异质集成技术。该技术虽然适合晶圆级大规模量产工艺，但对硅基 Ⅲ-Ⅴ族外延技术有着很高的材料生长要求，需要解决一系列诸如硅基异质材料外延、片上光源耦合及片上光源老化等难题；目前该技术仍处于学术研究阶段。

2.2 国际研发现状

近 10 年来，硅基光电子集成的关键材料和器件研究引起了科学界和工业界的广泛关注，仅美国 Intel 公司对硅基光电子的研发投入就高达数十亿美元。美国国防部高级研究计划局（DARPA）设立“用于通用微尺度光学系统的激光器”（LUMOS）项目，投入 1 900 万美元进行硅基异质材料集成光源的研究。日本能源与工业技术发展组织投入 22.5 亿日元用于硅基高亮度、高效率激光器的开发。欧盟“地平线 2020”投入 262 万欧元用于异质硅基光源的开发。在政府的一系列支持推动下，光电异质集成技术飞速发展，在学术和产业领域取得了一系列技术突破。

（1）学术研究方面。通过键合异质集成技术，以美国加州大学和比利时根特大学为代表的研究机构利用异质集成量子阱材料开发了硅基激光器[5,6]；美国哈佛大学通过 $LiNbO_3$ 硅基键合实现高速调制器[7]；美国惠普公司通过量子点材料键合实现了硅基激光器、微环调制器、探测器[8]；美国加州大学和丹麦科技大学通过键合 AlGaAs 材料实现光频梳[9,10]；瑞士洛桑联邦理工学院（EPFL）、美国加州理工大学联合加州大学通过 SiN 平台开发了各种光频梳器件[11]；日本 NTT 公司通过键合 InP 材料到 SiC 衬底，并利用后期生长异质集成的薄膜激光器实现了直调带宽 108 GHz 世界纪录的激光器[12]。直接生长异质集成的研究近年来主要有英国伦敦大学学院、美国加州大学等利用硅基直接外延量子点技术开发的一系列硅基光源，如硅基量子点

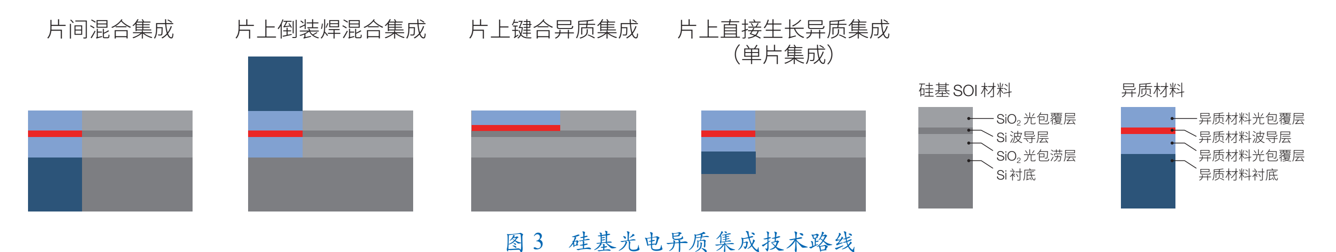


图 3　硅基光电异质集成技术路线

Figure 3　Silicon photonics heterogeneous integration platforms

微环激光器、锁模激光器、DFB激光器、可调激光器等[13,14]。

（2）产业方面。美国Luxtera公司、英国Rockley Photonics公司、美国Skorpio公司分别采用片间混合集成、片上倒装焊混合集成和片上异质集成技术实现了产品的展示。美国Intel公司于2016年利用片上键合异质集成技术已开发出100 Gbps 4通道硅光模块，至2021年已实现500万颗以上模块的销售，是目前世界上利用异质集成技术实现规模量产的唯一一家公司。同时，对于直接生长异质集成技术，美国Intel公司也正在布局硅基量子点激光器技术。除此之外，各大半导体代工厂如美国格芯（Global Foundries）、瑞士意法半导体、以色列Tower Jazz，以及我国台积电等公司均有硅光产线，其中格芯公司展示了使用片上倒装焊的混合集成方案，Tower Jazz公司通过与直接生长量子点激光器的美国Quintessent公司合作，计划采用直接生长异质集成方案进行硅光工艺开发。

2.3 我国研发进展

近年来，在“863计划”“973计划”和国家自然科学基金等支持下，我国也加大了硅基异质集成方向的研究力度，在硅基关键光电子集成器件等方面取得了一系列重要成果，调制、探测、复用与解复用等分立器件已经研制成功，异质集成衬底、光源、高速光电调制器等方向取得了一系列重要进展。

（1）学术研究方面。① 片上直接生长技术路线。中国科学院物理研究所通过硅图形化衬底上的同质加异质外延生长有效解决了硅上异质外延生长Ⅲ-Ⅴ族材料的难题，实现了高质量的硅基片上光源[15-17]。② 片上键合异质集成技术路线。中国科学院上海微系统研究所通过离子注入剥离技术研发出多种材料硅基异质集成衬底，包括SiCOI、LNOI、Ⅲ-ⅤOI，为多种材料硅基光电异质集成提供了材料平台②；北京大学、中国科学院半导体研究所等单位通过导电透明电极方案开发出mW量级硅基激光器[18]。③ 片间混合集成技术路线。上海交通大学、清华大学、国家光电子创新中心开发出窄线宽可调激光器[19-21]。④ 新型材料硅基光电异质集成领域。中山大学、华中科技大学、浙江大学等单位通过利用硅基薄膜铌酸锂开发出一系列高性能光电调制器、偏振控制器等器件[22-24]；北京大学、浙江大学、南京大学等单位利用稀土元素掺杂的方法进行硅基发光的尝试[25,26]；中国科学院半导体研究所、厦门大学利用硅基异质生长锗硅材料进行了光源器件的尝试[27]；浙江大学在硅基硫系化合物、二维材料集成光电领域取得了一系列器件成果，将硅基光电器件延伸到中红外波段[28,29]。

（2）产业方面。国内光模块公司大多还采用传统的透镜封装方案，目前尚未有公司在量产产品上使用异质集成解决方案。相比国外各大公司、代工厂的产业化发展，我国在硅基异质集成方面产业发展较为缓慢，尚未形成一定规模的公司基于异质集成技术开发产品并批量出货。① 异质集成材料。济南晶正公司制造的硅基$LiNbO_3$材料一枝独秀，是目前国内外几乎所有薄膜$LiNbO_3$调制器的材料供应商。② 异质集成材料器件。有一批从学校和科研院所孵化的创业公司浮现，如制作薄膜$LiNbO_3$调制器的江苏铌奥光电公司、生产硅基异质外延材料和光源的东莞思异半导体公司等。③ 异质集成模块。苏州易锐光电公司通过片间混合集成方式实现了密波10通道100 Gbps模块的小批量出货；青岛海信宽带公司利用键合集成技术做出过产品开发尝试，但目前尚无产品问世。

（3）硅光芯片制成平台。近年来，我国国家层面也加大了投入，逐渐与国外先进的硅光科研平台，如比利时微电子研究中心（IMEC）、新加坡科学技术研究院微电子所（IME）等工艺线接轨。重庆联合微

② 欧欣. XOI异质集成材料研究. 中国电子学会论文集, 2017.

电子中心、中国科学院微电子研究所、上海微技术工业研究院等单位已建成了各具特色的硅光工艺线；同时，中国科学院微电子研究所、重庆联合微电子中心还开发了用于设计的光电仿真软件，从软件设计端为未来做好布局。但是，相比国外，我国目前国内光模块厂商仍通过海外代工厂进行硅光芯片的流片。在异质集成方面，重庆联合微电子中心已对外开放 SiN 流片；而对于光源的异质集成方案，目前国内尚无厂家开放服务。

3 硅基光电异质集成技术发展趋势和思考

3.1 多种光电材料与硅基异质集成

硅基光电异质集成从材料上正在从Ⅲ-Ⅴ族材料与硅的异质集成逐渐发展为多种材料与硅的异质集成，如：SiN、$LiNbO_3$ 等材料也逐渐成为硅基异质集成的主要材料。为了充分利用不同材料的光电特性，甚至出现了多种材料同时异质集成在硅基衬底上的光电芯片，如：InP 量子阱材料与 SiN 和 SOI 间的多种材料异质集成所制造的超窄线宽硅基激光器，以及利用该平台实现的异质集成硅基光孤子频梳。随着键合技术平台的逐渐成熟，利用不同材料优势通过多种材料与硅基进行异质集成将成为未来发展的主流方向。

3.2 硅基光电异质集成技术路线向更高集成度发展

在异质集成技术路线上，硅基光电异质集成正从片间、片上混合集成走向片上键合异质集成和直接生长异质集成。表 1 从集成密度、生产效率和技术成熟度 3 个方面分析了上述 4 种异质集成技术的优劣。① *片间混合集成*。局限于两颗芯片间的混合集成，无法实现晶圆级生产，集成度和生产效率均受到了限制。② *片上倒装焊混合集成*。可以实现晶圆级集成工艺，但需要对用于异质集成的激光器和硅光晶圆器件进行特殊设计，如在硅光晶圆上制作用于高度对准的特殊结构和波导耦合结构、激光器的平坦化工艺用于倒装等，这些特殊工艺均会对最终产品良率产生影响，是该技术路线发展的难点。另外，片间和片上倒装焊混合集成技术路线均依赖于高精度封装设备，其对于设备机械对准精度要求达到 0.5 μm 量级，这导致该技术路线在高精密封装对准环节的耗时增加，具有较低的生产效率。目前，光电异质集成的商业化应用仍停留在片间、片上混合集成方案。片上异质集成方案具有高集成度、高生产效率的优势，是未来光电异质集成的发展方向。然而，无论是键合异质集成还是直接外延生长异质集成，均需要实现传统 CMOS 工艺线与异质材料工艺线的有机结合。③ *片上键合异质集成*。目前，只有美国 Intel 公司通过使用其原有的 CMOS 产线和Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体产线实现了片上键合异质集成技术路线的产品化。虽然目前只有该公司利用该技术路线实现量产，但已有多家公司（如美国惠普、美国 Skorpios 等公司）布局该方案，有望成为短期内高密度、多种材料异质集成的主流技术路线。④ *片上直接外延异质集成*。极具发展潜力，若能突破异质集成光耦合难题和异质选区外延生长难题，其将成为最接近传统 CMOS 工艺的异质集成技术路线，是未来硅基光电异质集成技术理想的解决方案。但仍需要科研探索进一步提高其技术成熟度，因而其是硅基光电异质集成需要加大研究投入的重点方向。

3.3 硅基异质集成技术逐步从研发走向应用

随着片间光互联和共封装技术（co-package）等技术节点的到来，在后 800 Gbps 时代硅基光电异质集成

表1　硅基光电异质集成技术路线对比

Table 1　Silicon photonics heterogeneous integration platform comparison

技术路线	集成密度	芯片生产效率	技术成熟度
片间混合集成	低	低	高
片上倒装焊混合集成	中	低	中
片上键合异质集成	较高	中	中
片上直接外延异质集成（单片集成）	高	高	低

技术将成为光电子集成领域的重要技术路线。未来大带宽、低功耗、集成化的数据互联需求使得现有模块化解决方案无法支撑，因此将促使光芯片向集成化发展，进而推动硅基光电异质集成芯片的产业化进程。从应用发展上，随着多种材料体系与硅基衬底的异质集成，应用也从传统的数据通信、电信光互联向多个领域拓展。例如，生物传感、激光雷达、光计算、光量子等方向均出现了基于硅基异质集成技术的解决方案。

目前，国内从事硅基光电异质集成技术的企业还比较少，主要原因是技术门槛很高，传统光通信企业普遍对这一新兴技术路线持观望态度。另外，该技术的商业化投入大，需要设计建设兼容异质材料与传统硅基 CMOS 晶圆线，需要极高的资金投入和极大的市场需求作为支撑。现有的光通讯市场需求很难支撑起一条商用 12 寸硅光产线与化合物半导体进行硅基光电异质集成，因此我国乃至世界很少有公司进行该技术的产业化。美国 Intel 公司利用其自身的传统 CMOS 产线降低生产成本，通过多年的技术开发，是目前唯一一家利用硅基光电异质集成技术实现数据中心 100 Gbps 光模块大批量出货的公司；其开发该技术的真正目的是为扩展摩尔和超越摩尔技术路线进行技术储备，以实现其处理器的片上光互联，达到未来光电集成芯片的技术引领。美国苹果公司预计在其下一代智能手表中采用硅光异质集成技术，有望为硅光异质集成拓展到消费电子市场。鉴于国际硅基光电异质集成技术研发与产业化态势，我国也迫切需要在该领域加速从研发走向应用与产业化。

总之，从可以预见的光通信应用到消费类传感应用及未来的光计算、光量子应用来看，硅基光电异质集成技术的市场需求才刚刚起步，未来有着广阔的发展空间。然而，目前国内在硅光产业领域只有深圳华为、武汉光迅和南京希烽光电等少数公司在积极研究，暂时还未启动硅基光电异质集成的产业化进程。虽然我国在硅基异质集成的某些细分领域处于国际先进水平，但在硅基光电异质集成的产业化方面还比较薄弱，建议建设硅基光电异质集成研究中心，利用国家投入的多条硅光研发产线与硅基光电异质集成中心及各领域有特色的科研院所共同合作，积极探索硅基光电异质集成的 CMOS 兼容半导体加工模式，加快产业化进程。

应该说相比于微电子产业，我国在光电子领域的某些技术储备已达到世界先进水平，是一个可以“并跑”甚至“领跑”的芯片领域，机遇十分难得。硅基光电异质集成技术作为未来光电子发展的重要技术需要国家的大力支持，以及该领域的产、学、研三者的紧密结合，以推动我国在未来集成光电子领域占据世界领先地位。

参考文献

1 周治平. 硅基光电子学. 北京: 北京大学出版社, 2012.
Zhou Z P. Silicon Based Optoelectronics. Beijing: Peking University Press, 2012. (in Chinese)

2 Soref R, Bennett B. Electrooptical effects in silicon. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(1): 123-129.

3 Liang D, Bowers J E. Recent progress in heterogeneous III-V-on-silicon photonic integration. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(1): 51-75.

4 Rahim A, Spuesens T, Baets R, et al. Open-access silicon photonics: Current status and emerging initiatives. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(12): 2313-2330.

5 Fang A W, Park H, Cohen O, et al. Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser. Optics Express, 2006, 14(20): 9203-9210.

6 Abbasi A, Verbist J, van Kerrebrouck J, et al. 28 Gb/s direct modulation heterogeneously integrated C-band InP/SOI DFB laser. Optics Express, 2015, 23(20): 26479-26485.

7 Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages. Nature, 2018, 562: 101-104.

8 Xiang C, Jin W, Huang D N, et al. High-performance silicon

photonics using heterogeneous integration. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 28(3): 1-15.

9 Chang L, Xie W, Shu H, et al. Ultra-efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator microresonators. Nature Communications, 2020, 11: 1-8.

10 Pu M H, Ottaviano L, Semenova E, et al. Efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator. Optica, 2016, 3(8): 823-826.

11 Shen B, Chang L, Liu J, et al. Integrated turnkey soliton microcombs. Nature, 2020, 582: 365-369.

12 Yamaoka S, Diamantopoulos N P, Nishi H, et al. Directly modulated membrane lasers with 108 GHz bandwidth on a high-thermal-conductivity silicon carbide substrate. Nature Photonics, 2021, 15(1): 28-35.

13 Shang C, Wan Y T, Selvidge J, et al. Perspectives on advances in quantum dot lasers and integration with Si photonic integrated circuits. ACS Photonics, 2021, 8(9): 2555-2566.

14 Chen S, Li W, Wu J, et al. Electrically pumped continuous-wave III-V quantum dot lasers on silicon. Nature Photonics, 2016,10(5): 307-311.

15 Huang J Z, Wei W Q, Chen J J, et al. P-doped 1300 nm InAs/GaAs quantum dot lasers directly grown on an SOI substrate. Optics Letters, 2021, 46(21): 5525-5528.

16 Wei W Q, Wang J H, Zhang B, et al. InAs QDs on (111)-faceted Si (001) hollow substrates with strong emission at 1300 nm and 1550 nm. Applied Physics Letters, 2018, 113(5): 053107.

17 Wei W Q, Zhang J Y, Wang J H, et al. Phosphorus-free 15 μm InAs quantum-dot microdisk lasers on metamorphic InGaAs/SOI platform. Optics Letters, 2020, 45(7): 2042-2045.

18 Tao L, Yuan L J, Li Y P, et al. 4-λ InGaAsP-Si distributed feedback evanescent lasers with varying silicon waveguide width. Optics Express, 2014, 22(5): 5448-5454.

19 Li S Y, Zhang D, Zhao J Y, et al. Silicon micro-ring tunable laser for coherent optical communication. Optics Express, 2016, 24(6): 6341-6349.

20 Zhao R L, Guo Y Y, Lu L J, et al. Hybrid dual-gain tunable integrated InP-Si_3N_4 external cavity laser. Optics Express, 2021, 29(7): 10958-10966.

21 Li Y, Zhang Y J, Chen H W, et al. Tunable self-injected fabry–perot laser diode coupled to an external high-Q Si_3N_4/SiO_2 microring resonator. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(16): 3269-3274.

22 He M B, Xu M Y, Ren Y X, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach–Zehnder modulators for 100 Gbit s–1 and beyond. Nature Photonics, 2019, 13(5): 359-364.

23 Lin Z, Lin Y, Li H, et al. High performance polarization management devices based on thin-film lithium niobate. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(24): 1423-1426.

24 Hu C R, Pan A, Li T A, et al. High-efficient coupler for thin-film lithium niobate waveguide devices. Optics Express, 2021, 29(4): 5397-5406.

25 Wang X J, Zhou P Q, He Y D, et al. Erbium silicate compound optical waveguide amplifier and laser. Optical Materials Express, 2018, 8(10): 2970-2990.

26 Yang Y, Li Y P, Wang C X, et al. Rare-earth doped ZnO films: A material platform to realize multicolor and near-infrared electroluminescence. Advanced Optical Materials, 2014, 2(3): 240-244.

27 Chen Y H, Li C, Zhou Z W, et al. Room temperature photoluminescence of tensile-strained Ge/$Si_{0.13}Ge_{0.87}$ quantum wells grown on silicon-based germanium virtual substrate. Applied Physics Letters, 2009, 94(14): 141902.

28 Li L, Lin H, Qiao S, et al. Integrated flexible chalcogenide glass photonic devices. Nature Photonics, 2014, 8: 643-649.

29 Liu C, Guo J, Yu L, et al. Silicon/2D-material photodetectors: From near-infrared to mid-infrared. Light: Science & Applications, 2021, 10(1): 1-21.

Development and Thinking of Silicon Photonics Heterogenous Integration

WANG Zihao　WANG Ting　Zhang Jianjun*
（1 Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2 Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China）

Abstract　Integrated photonics are fast-developing research field for next generation information technology. Current silicon photonic integrated chips strongly benefit from low-cost and high-density integration properties of existing CMOS technology. But limited by the physical properties of silicon, it is not a perfect material for different types of optoelectronic devices, such as laser sources, modulators, and infrared detectors. Therefore, heterogeneous integration is proposed by combining the advantages of CMOS process and superior opto-electric properties of heterogenous material systems, that can be an essential step towards next generation integrated optoelectronic chips. Here, this paper introduces the rapid progress of integrated photonics nationally and worldwide, while discusses the potential directions and opportunities in this field.

Keywords　photonic integration, silicon photonics, heterogenous integration



王子昊　中国科学院物理研究所副研究员，松山湖材料实验室兼职副研究员。主要研究领域：量子点激光器、硅基光电异质集成等。主持和参与中国科学院、科学技术部、国家自然科学基金委员会等单位的5项重大课题。E-mail: wangzihao@iphy.ac.cn

WANG Zihao　Associate Professor of Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS) and Songshan Lake Materials Laboratory. His research focuses on quantum dots lasers and Si photonics heterogenous integration. In recent years, he has mainly undertaken and participated 5 projects sponsored by the CAS, Ministry of Science and Technology, National Natural Science Foundation of China, and so on.
E-mail: wangzihao@iphy.ac.cn



张建军　中国科学院物理研究所研究员，松山湖材料实验室兼职研究员。主要研究领域：硅基光电异质集成、量子计算、原子制造等。近年主持中国科学院、科学技术部、国家自然科学基金委员会等单位的10余项重大课题。E-mail: jjzhang@iphy.ac.cn

ZHANG Jianjun　Ph.D. in Physics, Professor of Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS) and Songshan Lake Materials Laboratory. His research focuses on Si photonics heterogenous integration, quantum computing, atomic fabrication, etc. In recent years, he has mainly undertaken more than 10 major projects sponsored by the CAS, Ministry of Science and Technology, National Natural Science Foundation of China, and so on. E-mail: jjzhang@iphy.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

*Corresponding author